



# 追跡型投影による人間の視覚特性を利用した 運動物体の不可視化と方向・速度操作

佐藤 健吾<sup>1)</sup>, 寺島 裕貴<sup>2)</sup>, 西田 真也<sup>3)</sup>, 渡辺 義浩<sup>1)</sup>

Kengo SATO, Hiroki TERASHIMA, Shin'ya NISHIDA and Yoshihiro WATANABE

1) 東京工業大学 工学院 情報通信系 (〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G2-31, sato.k.cc@m.titech.ac.jp)

2) NTT コミュニケーション科学基礎研究所 (〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1)

3) 京都大学 大学院情報学研究所 知能情報学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

**概要:** 数 ms のレイテンシで動作する高速プロジェクタ・カメラシステムを用いることで、未知の運動をする物体に遅れなく追従する投影が可能である。本稿では、投影により対象に光が当たらない状態を保ちつつ、背景における輝度変化を知覚上で補正することにより、対象の位置を不可視化する手法の高精度化を検証する。また、周辺視野において発生する錯覚を利用した、対象の運動方向・速度に対する知覚の操作を検証する。

**キーワード:** 視覚, 感覚・知覚, プロジェクタ

## 1. はじめに

人間の視覚には様々な特性があり、それらは必ずしも起こっている現象を正しく知覚するのに役立つとは限らない。本稿では、視覚の特性を逆手に取り、実物体に対して現実とは異なる現象を知覚させることに注目し、これを知覚操作と呼ぶ。特に、照明を制御することで運動物体の見た目を変化させる知覚操作に注目する。

近年では、人間の知覚を遙かに上回る速度で投影が可能な高速プロジェクタ [1] を、動的に操作することが可能な照明として用いることで、周期運動する物体に対して知覚操作を行う研究が報告されている [2, 3, 4]。また、プロジェクタに加えて高速なビジョンシステムを用いることで、未知の運動をする物体に対しても、知覚操作を行う例が報告されている [5]。

そこで我々は、このような照明を用いた知覚操作をスポーツに導入することを目的とする。そのために、エアホッケーにおいて、背景に対する知覚を通常通りに維持したまま、バックのみを不可視化するシステム [6] を提案した。これは、投影により対象に光が当たらない状態を保ちつつ、人間の視覚の性質である視覚的持続 [7] を利用することで、背景における輝度変化を知覚上で補正し、対象の位置を不可視化するものである。

しかし同手法には、Transient Twinkle Perception (TTP) [8] と呼ばれる現象が発生する、対象の位置に応じて投影される固定幅の縞模様では完全な補正を行うことができない、などの理由により背景にアーティファクトが生じる問題があった。

そこで本稿では、バックの位置だけではなく速度を考慮し、縞模様の幅を適応的に設定することで、TTP を抑制し

つつ十分な補正を行う手法を提案する。さらに、提案手法による不可視化の効果を定性評価により確認するとともに、既存手法との比較を行い、アーティファクトが軽減されたことを確認した。

また本稿では、motion-induced position shift (MIPS) に関連する錯覚である curveball illusion [9] を利用し、投影によってバックの運動方向と速度を変化させる新たな知覚操作を提案する。MIPS とは、物体の位置を知覚する際に位置情報と無関係な運動情報の影響を受け、位置がずれて知覚される現象である。提案手法によりバックの運動方向及び速度の知覚に変化が生じることを確認した。

## 2. 手法概要

システムの構成を図 1 に示す。本システムでは、高速カメラと高速プロジェクタをそれぞれ 1 台使用し、赤外画像を用いた対象の追跡を行う。カメラには可視光カットフィルタを取り付け、赤外画像を撮像する。追跡の対象となるバックには再帰性反射材マーカを取り付ける。プロジェクタ平面上の座標とカメラ平面におけるマーカの重心座標は、予め求めたホモグラフィによって位置を変換可能である。

本システムでは、エアホッケーのバックを対象物体とすることで、任意の視点から投影面を観測することが可能となる。また同時に、背景と対象物体の位置関係が視点に依らない環境での投影が可能となる。なお、環境光のない暗所で、バックは単一かつ単純な運動をしていることを前提とする。

構築したシステムの外観を図 2 に示す。プロジェクタとして 1000 fps 以上で 8 bit 階調投影が可能な高速プロジェクタ (解像度 1024 × 768) [1] を用いた。カメラとして、525

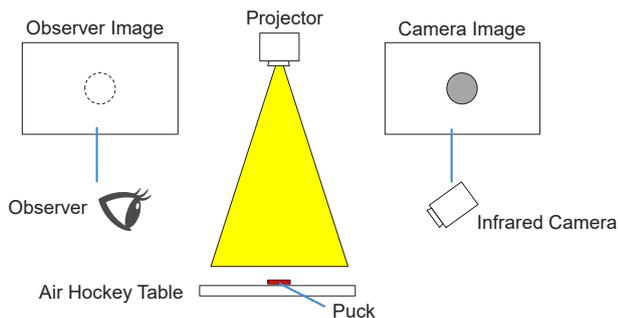


図 1: システム構成図. 投影により, 観測者の知覚が操作される. 一方, カメラは赤外画像を撮るため, 投影の影響を受けず対象物体を捉え続けることができる.

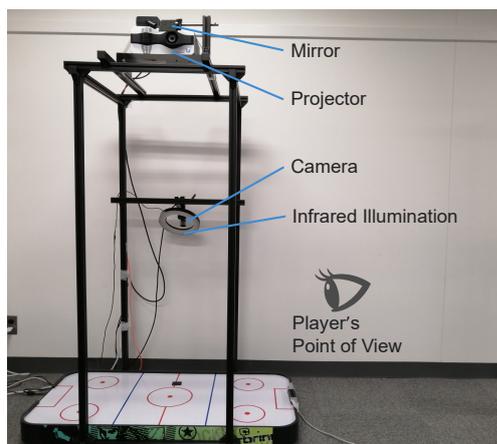


図 2: 構築したシステム. ミラーを用いて投影光の方向を変更している.

fps でモノクロ撮影可能な高速カメラ (解像度  $720 \times 540$ ) に可視光カットフィルタを装着したものを用了. 計算機は, Xeon E5-2687W v4 dual を搭載したものを用了. 赤外画像を撮影するための照明として赤外リング照明を使用した.

また, システム遅延により投影画像と対象物体の間にズレが生じることを避けるため, 対象が数フレームの間等速運動することを仮定した物理モデルと位置・速度からカルマンフィルタを用いて予測を行った. システム遅延は, 従来研究 [6] と同様の予備実験より, 7.6 ms と設定された. プロジェクタは 1000 fps, カメラは 500 fps で使用した. 以降では, 本システムを用いて 2 つの知覚操作手法を提案する.

### 3. 不可視化

ここでは, 既存の不可視化手法で問題となった背景に発生するアーティファクトを軽減する手法について述べる. 既存手法 [6] では, パックが十分高速な場合は図 3 左上に示すような固定幅の縞模様を追従するように投影し, パックが低速な場合は図 3 左下に示すような空間的に一様な光を投影することで点滅周期が一定に保たれ, TTP を抑制した不可視化が実現した. しかし, 図 3 右に示すように, 縞模様投影時の各点で光が当たる時間  $T_{on}$  と当たらない時間  $T_{off}$  が等しくないため積分輝度が異なり, 結果としてアーティ

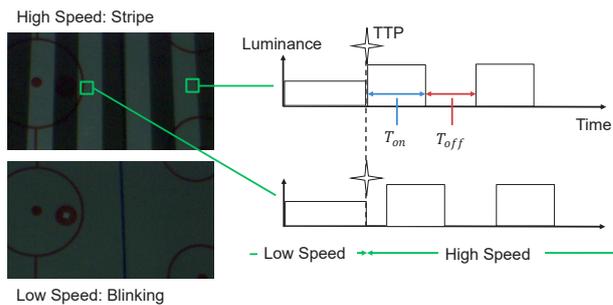


図 3: 高速時の投影画像 (左上) と低速時の投影画像 (左下), 各点の輝度変化 (右). パックの運動速度に応じて縞の幅  $l_s$  を調整することで,  $T_{on} = T_{off}$  となり, 積分輝度が一定に保たれる.

ファクトが発生する問題があった.

この問題を解決するため, 一定速度  $v$  で動くパックに追従する縞模様を投影することを考える.  $T_{on}$  と  $T_{off}$  を一定にするためには, 縞模様の運動方向の幅  $l_s$  が速度  $v$  の  $T_{on} (= T_{off})$  倍であればよい. また同時に, 点滅の周期  $T_{on} + T_{off}$  が臨界融合周波数  $f_{CFF}$  の 1 周期以下である必要がある. これらを満たす  $l_s$  の条件は, 以下の式 (1), (2) より定まる.

$$l_s = vT_{on} \quad (1)$$

$$T_{on} + T_{off} < \frac{1}{f_{CFF}} \quad (2)$$

また, 不可視化を成功させるためには, パックが縞の中に収まる必要がある. 投影中にもパックが移動することを考えると, 縞に収まるための条件は, パックの直径  $l_p$ , 速度  $v$ , プロジェクタのフレームレート  $f_P$  と, 縞の幅  $l_s$  を用いて以下の式 (3) のように表せる. したがって, パックの速度  $v$  がこの式を満たす場合を高速時, 満たさない場合を低速時として投影を行う.

$$l_p < v(T_{on} - \frac{1}{f_P}) \quad (3)$$

#### 3.1 実験環境

対象物体として直径  $l_p = 50$  mm の赤いエアホッケーのパックを使用した. 実験環境における臨界融合周波数は観測者 1 名による定性的評価を行い,  $f_{CFF} = 30$  Hz 程度とした.  $T_{on}$  は 16 ms とした. 対象運動として使用したパックは,  $v = 8$  mm/ms 程度で運動していた. また, プレイヤー視点にカメラ (解像度  $640 \times 480$ ) を設置し, 30 fps, グローバルシャッターで動画を撮影した.

#### 3.2 実験

プレイヤーから見て奥から手前に向かってくるパックに対して提案手法による不可視化を行い, 観測者 1 名により定性的な評価を行った. また比較実験として, 固定幅の縞模様を投影する既存手法 [6] による不可視化を行った場合と, 不可視化を行わずに空間的に一様な光を投影した場合についても同様の評価を行った. 一様光を投影した際の撮像結果を図 4 上段に, 既存手法による不可視化の撮像結果を図

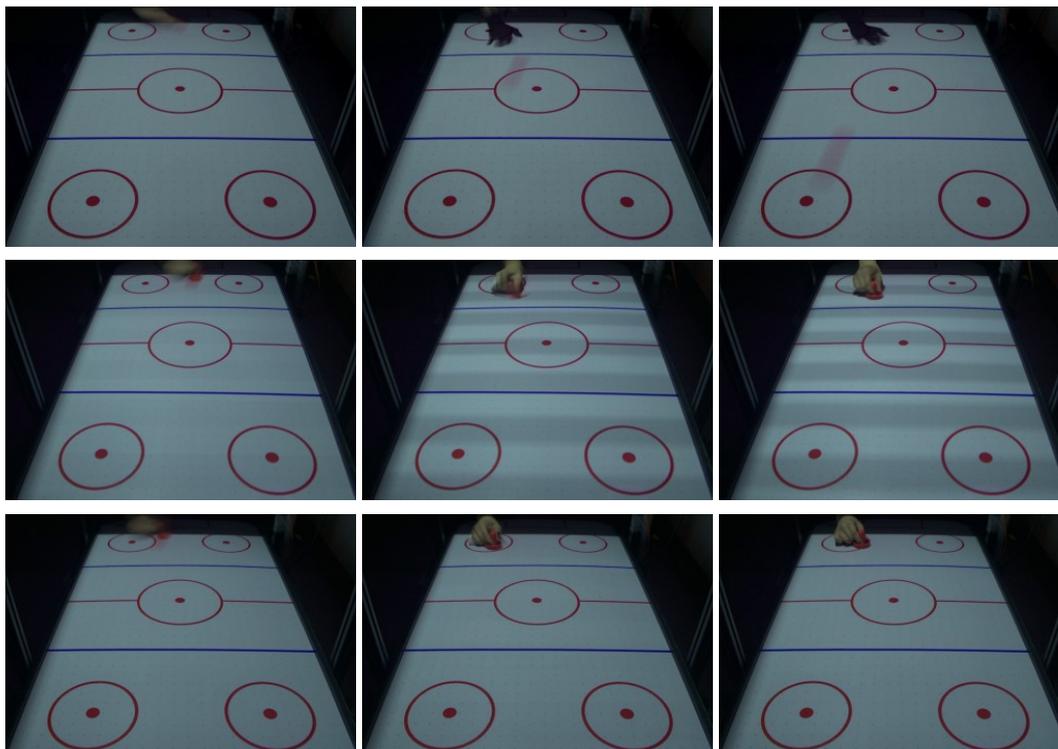


図 4: 一様光投影の結果 (上段), 既存手法 [6] の実験結果 (中段), 提案手法の実験結果 (下段) を 30 fps で撮影した時系列画像 (2 フレーム間隔). 上段では, パックの残像が写っているのに対し, 中段右・下段右では写っていないことから, 位置を特定できないことがわかる. また, 中段右では背景に縞模様が現れているのに対し, 下段右では知覚できない.

4 中段に, 提案手法による不可視化を行った際の撮像結果を図 4 下段に示す.

定性評価・撮像結果の双方から, 提案手法・既存手法では対象物体の位置が特定できない一方で, 一様光投影時には特定できることを確認した. また, 提案手法では既存手法に比べて, 背景に生じるアーティファクトが軽減されていることを確認した.

### 3.3 考察

実験の結果, 一様光投影時にはパックの位置が特定できるのに対し, 既存手法・提案手法による知覚操作時には位置が特定できないことがわかる. また, 既存手法では背景にちらつきが知覚できるのに対し, 提案手法では知覚できないことがわかる.

## 4. 方向・速度操作

ここでは, curveball illusion [9] を利用し, 運動方向や速度に対する知覚を変化させる. この錯覚の概要を図 5 に示す. これは周辺視野において, 物体が通過するようなグローバルな運動情報とその物体の領域内を動くローカルな運動情報が提示されると, それらを統合した方向への運動を知覚するものである. 本システムでは, 局所的な刺激をパックの上のみに遅れなく投影することで, この錯覚を発生させる.

通常のディスプレイ上で錯覚効果を体験する際には, 全く同じ映像を繰り返し再生することができる. これにより, 中心視野と周辺視野での知覚を比較し, 錯覚が運動知覚に

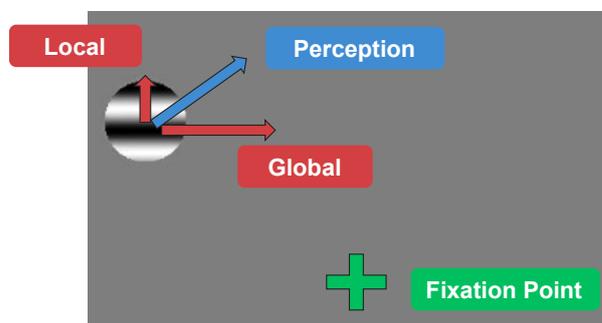


図 5: curveball illusion [9] の概要. 下部の十字を注視した場合, 右向きグローバルな運動と上向きローカルな運動が統合され, 右上方向の運動が知覚される.

与える影響を知ることが可能である. これに対し, 実物体に投影を行う場合には, 繰り返し同じ運動を提示することができないため, 観測者は自身の知覚と実物体の運動がどれほど乖離しているのかを知る術がなく, 効果を体験することができない. そこで本稿では, 1 試行のうちに投影する局所的な刺激の運動方向を反転させることを提案する. これにより, 投影による運動知覚の変化度合いを相対化し, 錯覚の寄与を体験することが可能になる.

### 4.1 実験環境

本稿では, 局所的な刺激として正弦波を用いた. 運動方向操作を行う際には正弦波をパックの運動と垂直に動くように投影し, 1 試行中に縞の運動方向を 2 回反転させた. また速度操作を行う際は, 正弦波をパックの運動と平行する

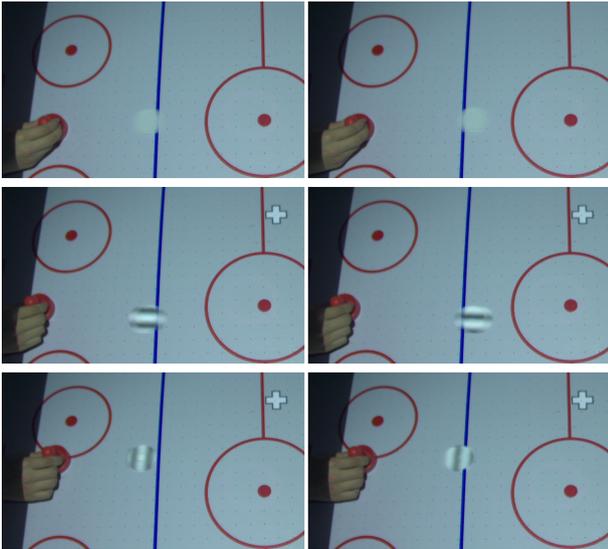


図 6: 一様光投影時の様子 (上段), 運動方向操作の様子 (中段), 運動速度操作の様子 (下段). いずれも左から右に運動するパックに対して投影を行っている.

方向に動くように投影し, 1 試行中に縞の運動方向を 1 回方向を反転させた. 縞模様は 1 周期が 28 mm で, 11 Hz で運動させた. 対象物体を周辺視野で観測するために, 注視点として縦横 43 mm 程度の十字を投影した. パックは直径 50 mm の白いものを用い, 0.75 mm/ms 程度で運動していた. また, プレイヤー視点にカメラ (解像度 640 × 480) を設置し, 60 fps, グローバルシャッターで動画を撮影した.

#### 4.2 実験

プレイヤーから見て奥から手前に向かってくるパックに対して方向操作と速度操作を行い, 観測者 1 名により定性的な評価を行った. また比較実験として, 知覚操作を行わずに空間的に一様な光を投影した場合についても同様の評価を行った. 比較実験の様子を図 6 上段に, 速度操作の様子を図 6 中段に, 提案手法による方向操作の様子を図 6 下段に示す. 主観評価から, 投影によってパックの運動方向及び速度が変化しているように知覚されることを確認した.

#### 4.3 考察

実験の結果, 投影によりパックの運動方向及び速度が変化しているように知覚されることを確認した. 今回の実験では, 錯覚の効果が十分に得られることがわかっている正弦波パターンを投影した. しかし, 視覚系の神経科学や心理学の分野では局所刺激の種類や速度と錯視の大きさの関係についての議論がすすめられている. したがって, 今後より適切なパターンを投影することで, より効果的な知覚操作を行うことが可能になると考えられる.

また, 今回の実験では観測者に注視点を指示することでパックを周辺視野で観測する状況を作り出した. しかしこれは通常のエアホッケーを考えると違和感のある状況設定である. したがって, より自然な文脈で周辺視野を用いて運動物体を観測する舞台設定をすることが今後の課題である.

## 5. 結論

本稿では, スポーツのエアホッケーにおける, 視覚特性を利用した運動物体に対する知覚操作に注目した. 従来研究においては, パックの視認を妨げることに成功していたが, 背景にちらつきが発生する問題があった. そこで本稿では, 投影する縞模様の幅や輝度を調整することでアーティファクトを軽減し不可視化を行う手法を提案した. また, 新たな知覚操作として, パックの運動方向や速度に対する知覚を操作する手法を提案した.

また本稿では, 注視点を表示した環境下で, パックの運動方向及び速度操作を実現した. 今後の課題として, より自然な形で知覚操作を行うアプリケーションを設計すること, 投影内容を最適化することが挙げられる.

### 参考文献

- [1] Yoshihiro Watanabe, Gaku Narita, Sho Tatsuno, Takeshi Yuasa, Kiwamu Sumino, and Masatoshi Ishikawa. High-speed 8-bit image projector at 1,000 fps with 3 ms delay. In *IDW*, pages 1064–1065, 2015.
- [2] Shogo Fukushima and Takeshi Naemura. Wobble strings: Spatially divided stroboscopic effect for augmenting wobbly motion of string instruments. *Entertainment Computing*, 19:101–111, 2017.
- [3] Leo Miyashita, Kota Ishihara, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. ZoeMatrope for realistic and augmented materials. In *SIGGRAPH ASIA 2016 Emerging Technologies*, 2016.
- [4] Takatoshi Yoshida, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Phyxel: Realistic display of shape and appearance using physical objects with high-speed pixelated lighting. In *UIST*, page 453–460, 2016.
- [5] Kentaro Fukamizu, Leo Miyashita, and Masatoshi Ishikawa. Elamorph projection: Deformation of 3d shape by dynamic projection mapping. In *ISMAR*, pages 164–173, 2020.
- [6] 佐藤 健吾, 渡辺 義浩. 追跡型構造化光による運動物体の不可視化の検証. 第 26 回バーチャルリアリティ学会大会, (3B1-3), 2021.
- [7] Richard Langton Gregory. 脳と視覚: グレゴリーの視覚心理学. プレーン出版, 2001.
- [8] Yutaka Nakajima and Yutaka Sakaguchi. Transient twinkle perception is induced by sequential presentation of stimuli that flicker at frequencies above the critical fusion frequency. *Attention, perception and psychophysics*, 77:2711–2727, 2015.
- [9] Arthur Shapiro, Zhong-Lin Lu, Chang-Bing Huang, Emily Knight, and Robert Ennis. Transitions between central and peripheral vision create spatial/temporal distortions: A hypothesis concerning the perceived break of the curveball. *PLOS ONE*, 5:1–7, 2010.